

УДК 621.967

В. Л. КАЛЮЖНИЙ, Д. В. КАСЯН, Р. Л. РУСАКОВ**АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ НЕПОВНІСТЮ ВІДКРИТОГО ВІДРІЗАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ КРУГЛОГО ПРОКАТУ ЗСУВОМ У ШТАМПІ НА ПРЕСІ**

Показана та описана схема неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі на пресі. Методом скінченних елементів, з використанням програми DEFORM-3D, створено математичну модель та проведений комп'ютерний аналіз вказаного процесу для отримання заготовок із маловуглецевої сталі. Використана пружно-пластична модель металу. Виявлений вплив величини зазору між рухомих та нерухомих ножами на енергосилові параметри відрізання, напружений стан в осередку деформації та кінцевий деформований стан в момент відокремлення заготовки. Встановлені залежності ертикального та поперечного зусиль відрізання на рухомому ножі від його переміщення. Приведений розподіл компонент напружень при максимальному значенні зусилля відрізання, а також показаний розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях між заготовкою, що відрізається, та ножами. Визначено вплив величини зазору між ножами на напрямок розвитку тріщин у прутку при відрізванні. Наведений розподіл деформацій в осередку відрізання. Установлені форми і розміри заготовки після відрізання. Розрахунковим шляхом визначені всі необхідні дані для проектування технології та штампного оснащення для відрізання заготовок довжиною 10 мм із прутка діаметром 10 мм.

Ключові слова: відрізання заготовок; круглий прокат; метод скінченних елементів; зусилля відрізання; пластинчатий ніж; втулочний ніж; напруження; деформації.

В. Л. КАЛЮЖНИЙ, Д. В. КАСЯН, Р. Л. РУСАКОВ**АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА НЕПОЛНОСТЬЮ ОТКРЫТОЙ ОТРЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОКАТА СДВИГОМ В ШТАМПАХ НА ПРЕССЕ**

Показана и описана схема неполностью открытой отрезки заготовок из круглого проката в штампе на прессе. Методом конечных элементов, с использованием программы DEFORM-3D, создана математическая модель и проведен компьютерный анализ указанного процесса для получения заготовок из малоуглеродистой стали. Использована упруго-пластическая модель металла. Выявлено влияние величины зазора между подвижным и неподвижным ножами на энергосиловые параметры отрезки, напряженное состояние в очаге деформации и конечное деформированное состояние в момент отделения заготовки. Установлены зависимости осевого и поперечного усилий отрезки на подвижном ноже от его перемещения. Приведены распределения компонент напряжений при максимальном значении усилия отрезки, а также показано распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях между заготовкой, что отрезается, и ножами. Определено влияние величины зазора между ножами на направление развития трещины в прутках при отрезке. Приведены распределения деформаций в очаге деформации. Установлены формы и размеры заготовки после отрезки. Расчетным путем определены все необходимые данные для проектирования технологии и штамповой оснастки для отрезки заготовок длиной 10 мм из прутка диаметром 10 мм.

Ключевые слова: отрезка заготовок; круглый прокат; метод конечных элементов; усилия отрезки; пластинчатый нож; напряжения; деформации.

V. KALJUZHNY, D. KASIAN, R. RUSAKOV**ANALYSIS OF THE PROCESS OF INCOMPLETELY OPEN CUTTING OF WORKPIECE OF A ROUND METAL RODS WITH SHEAR IN PRESS DIE BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

The scheme of incompletely open cutting of round-rolled billets in a press on a press is shown and described. The finite element method using the DEFORM-3D program created a mathematical model and conducted a computer analysis of the process for obtaining billets from low carbon steel. Used elastic-plastic model of metal. The influence of the size of the gap between moving and stationary knives on the energy-power cutoff parameters, the stressed state in the deformation cell and the final deformation state at the time of the workpiece separation are found. The dependencies of the axial and transverse cutting forces on the moving knife from moving it are established. The distribution of stress components at the maximum value of the cutoff effort is shown, as well as the distribution of specific forces on the contact surfaces between the cut-off billet and the knives. The influence of the size of the gap between the knives on the direction of development of the cracks in the bar at the cutting is determined. The distribution of the deformation component in the cutting branch is given. Established forms and size of the workpiece after cutting. All the necessary data for the design of technology and stamp equipment for the cutting of 10 mm billets from a 10 mm diameter bar are determined by calculation.

Keywords: cutting of workpiece; round rods; finite element method; cutting force; movable plate cutter; sleeve cutter; stress; strain.

Вступ. Вихідні заготовки із круглого прокату під подальше формоутворення виробів процесами холодного об'ємного штампування в основному отримують способами відрізання на токарних верстатах та відрізанням зсувом в штампах на пресах. Процес відрізання зсувом в штампах на пресах характеризується високою продуктивністю та являється практично безвідхідним в порівнянні з отриманням заготовок на токарних верстатах.

Основи теорії процесів відрізання, рекомендації по конструктивних, енерго-силових режимах та по проектуванню штампного оснащення для різних схем відрізання викладені в джерелі [1]. В теперішній час відрізанням заготовок зсувом в штампах отримують

заготовки діаметром до 80 мм [2]. У цій роботі також приведені рекомендації по розташуванню прутків відносно напрямку сили відрізання, які дозволяють зменшити енерго-силові режими для відрізання заготовок більших за 80 мм.

В останній час в області розділення сортового прокату на заготовки відбувається пошук шляхів підвищення якості отриманих заготовок. В роботах [3–5] показано, що створення додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації при відрізванні заготовок дозволяє суттєво підвищити точність форми зовнішньої поверхні та торців відокремленої заготовки. Для цього запропоновані відповідні конструкції штампів. Використання

обертально-поступального руху ножів при відрізання також забезпечує підвищення якості отриманих заготовок [6, 7]. Покращення якості в напівфабрикатів і виробів в розділових процесах обробки металів тиском, зокрема і при відрізання заготовок із прутків круглого і фасонного перерізу, забезпечується створенням нового спеціалізованого ковальсько пресового обладнання для вказаних процесів [8, 9].

Актуальними задачами для відрізання заготовок із прутків в штампах є подальше доскональне дослідження закономірностей відрізання, силових режимів, питомих зусиль на ножах з урахування комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів, які впливають на цей процес. Такі задачі можна вирішити шляхом комп'ютерного моделювання з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) [10, 11]. Особливо це важливо для способу неповністю відкритого відрізання, який широко використовують для виробництва мірних вихідних заготовок під подальше холодне об'ємне штампування.

Мета роботи. Метою роботи є використання метода скінченних елементів для встановлення впливу осьового зазору на параметри неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прутка в штампі на пресі.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу неповністю відкритого відрізання [1] заготовок із круглого прокату зсувом в штампі на пресі приведена на рис. 1. Пруток 1 діаметром d подають через нерухомий втулочний ніж 2, який розміщений в корпусі 3. Втулочний ніж має ширину b і отвір діаметром d_n . Корпус 3 закріплений на нижній плиті 4 штампа. Переміщення прутка при подачі обмежено упором 5, який визначає довжину заготовки l , що відрізається. Рухомий пластинчастий ніж 6 шириною b закріплений в корпусі 7, а корпус 7 зафіксований до верхньої плити 8 штампа.

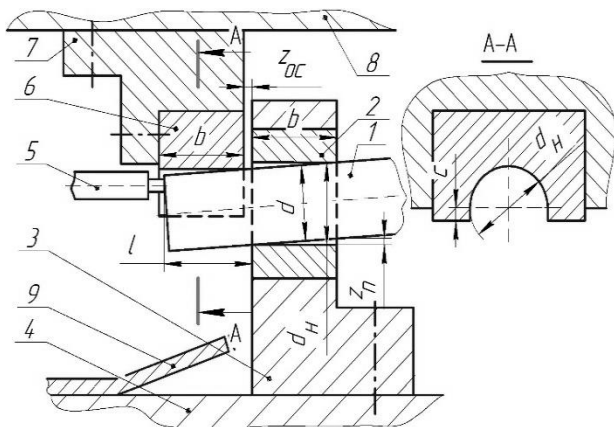


Рис. 1 – Схема процесу неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату зсувом в штампі

Ніж 6 має круглу робочу поверхню діаметром d_n і пряму частину висотою s . Відрізання заготовки виконується при переміщенні верхньої плити 8 з ножом 6 вниз, а отримана заготовка скочується по похилій поверхні лотка 9. Між прутком 1 і нерухомим

ножом 2 має місце поперечний зазор z_n . Рухомий і нерухомий ножі встановлені на плитах штампу з осьовим зазором z_{oc} між собою.

Розрахунок параметрів відрізання проводили шляхом моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM-3D. Для видавлювання використали циліндричний пруток із сталі 10 діаметром $d=10$ мм і довжиною 30 мм. Довжина заготовки, що відрізається, складала $l=10$ мм, а швидкість деформування – $V_0=5$ мм/сек. Величина зазору $z_n=0,5$ мм, а відрізання проводили з різними осьовими зазорами: $z_n=0,0; 0,25; 0,5$ і $0,75$ мм. Розміри ножів $d_n=10,5$ мм, $c=2$ мм.

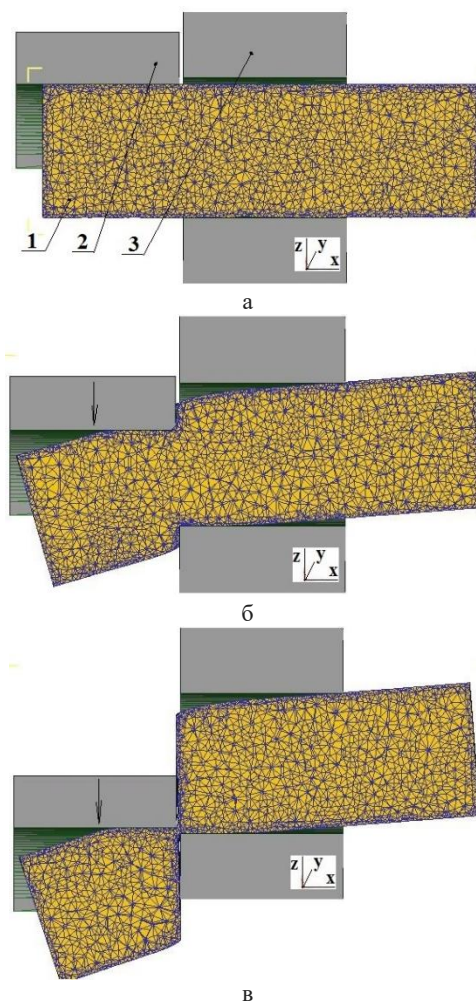


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі: а – на початку відрізання, б – при максимальному зусиллі відрізання, в – в момент відокремлення заготовки

Розрахункові схеми в розрізі для зазору $z_n=0,25$ мм наведені на рис. 2. Тут і в подальшому показаний розріз в напрямку вісі z по середині прутка. На рис. 2, а показана схема на початку відрізання. Пруток встановлений в рухомому ножі 2 через нерухомий ніж 3. На частину Положення при максимальному зусиллі відрізання зображене на рис. 2б, а в момент відокремлення заготовки – на рис. 2, в.

Обговорення результатів. В процесі відрізання ножі витримують безпосередньо зусилля відрізання P_v , яке виникає в напрямку переміщення рухомого ножа (в напрямку вісі z , та розпираюче зусилля P_p , діє в поперечному напрямку (в напрямку вісі x). Силкові режими відрізання показані на рис. 3. Для прикладу, на рис. 3а, представлені залежності цих зусиль, яке витримує рухомий ніж на протязі відрізання, від його переміщення ($z_{oc}=0,0$). Зусилля спочатку зростають і досягають максимальних значень $P_v=23$ кН і $P_p=6,7$ кН при переміщенні рухомого ножа 2,9 мм. Далі зусилля зменшуються до повного відокремлення заготовки від прутка. Найбільша величина розпираючого зусилля складає $P_p=0,34P_v$, що відповідає даним джерела [1].

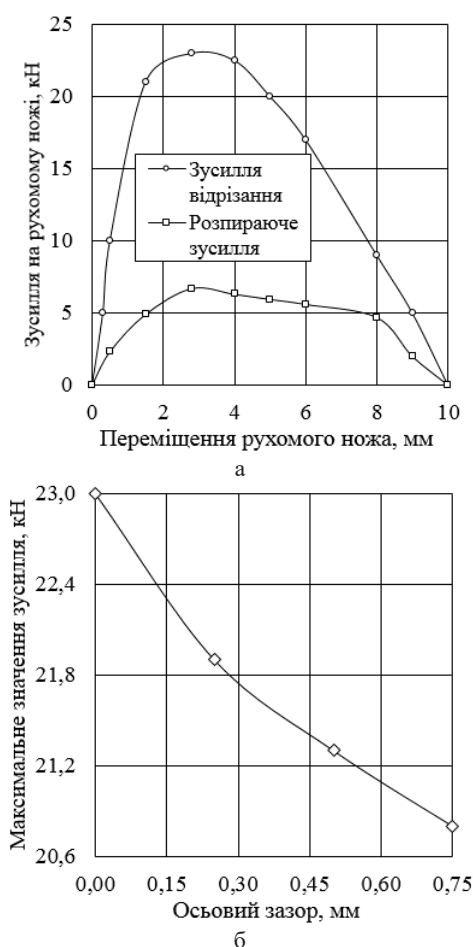


Рис. 3 – Силкові режими відрізання: а– залежності зусиль, яке витримує рухомий ніж при відрізанні, від його переміщення, б – залежність максимального зусилля відрізання від величини осьового зазору

Залежність максимального зусилля відрізання від величини осьового зазору зображена на рис. 3, б. Збільшення осьового зазору приводить до зменшення зусилля відрізання.

Моделюванням встановлені кінцеві форми і розміри заготовок. Для розглянутих величин зазорів на отриманих заготовках мають місце ум'ятини і утяжини на поверхні та викривлення на торцях (див. рис. 2в). Для пояснення причин таких дефектів був визначений

напружено-деформований стан в осередку деформації при відрізанні для максимального зусилля відрізання та на початку відокремлення заготовки від прутка. Ум'ятини утворюються завдяки великим питомим зусиллям, що виникають на поверхні контакту рухомого ножа з частиною прутка, що відрізається, та на поверхні нерухомого ножа і самим прутком. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу напружень в напрямку вісі z , яка співпадає з переміщенням рухомого ножа. На рис. 4 приведений розподіл напружень σ_z при максимальному значенні зусилля відрізання із зазором $z_{oc}=0,0$. На поверхнях контакту між ножами і частиною прутка, що відрізається, та самим прутком виникають стискаючі напруження величиною $\sigma_z=-720$ МПа. Вказана величина досягає $\sigma_z=3,6\sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості матеріалу прутка). Необхідно відмітити, що при відсутності поперечного зазору у прутку в області біля рухомого ножа виникають розтягуювальні напруження величиною $\sigma_z=420$ МПа. Величина $\sigma_z=96$ МПа отримана у частині прутка, що відрізається в зоні поруч з нерухомим ножом. Розтягуювальні напруження σ_z разом з напруженнями σ_x є причиною утворення утяжин на отриманих заготовках.

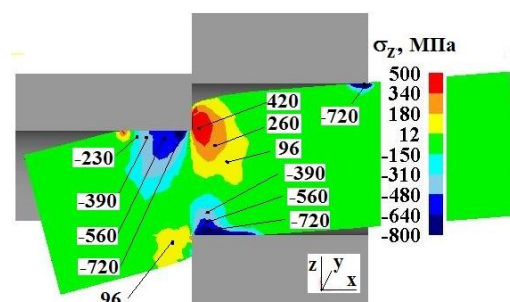


Рис. 4 – Розподіл напружень σ_z при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,0$ мм

Розподіл напружень σ_x для наведеного випадку наведений на рис. 5. У самому прутку, в області біля рухомого ножа, виникають розтягуювальні напруження величиною $\sigma_x=350$ МПа. Зі збільшенням осьового зазору зростає величина утяжини в області торців отриманої заготовки.

Причиною утворення викривлень на торцях заготовки є великі розтягуювальні напруження σ_x , які виникають наприкінці процесу відрізання. На рис. 6 наведені розподіли напружень σ_x наприкінці відрізання заготовок із зазорами $z_{oc}=0,25$ мм і $z_{oc}=0,75$ мм.

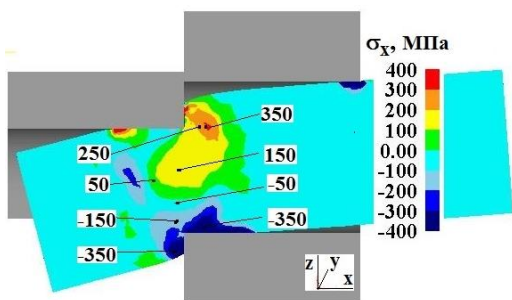


Рис. 5 – Розподіл напружень σ_x при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,0$

При відрізанні із $z_{oc}=0,25$ мм в осередку деформації в частині прутка, що відокремлюється та в самому прутку виникають напруження у межах $\sigma_x=105\div445$ МПа (рис. 6, а). Вказані напруження приводять до незначного відставання металу від рухомого та нерухомого ножів та утворення дефекту у вигляді викривлення. Збільшення величини зазору z_{oc} при відрізанні дає зростання розтягувальних напружень σ_x і величини викривлення.

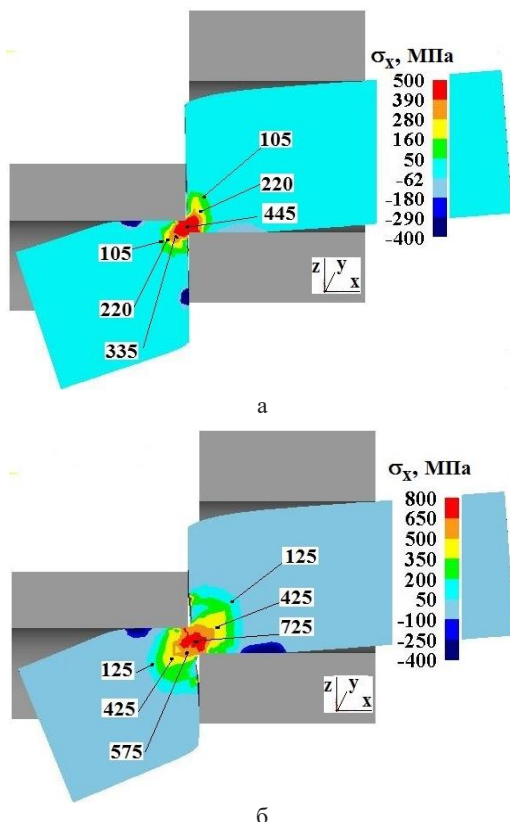


Рис. 6 – Розподіл напружень σ_x наприкінці відрізання: а – із зазором $z_{oc}=0,25$ мм, б – із зазором $z_{oc}=0,75$ мм

При відрізанні із зазором $z_{oc}=0,75$ мм в осередку деформації вже виникають напруження у межах $\sigma_x=125\div725$ МПа, величина викривлення по висоті і ширині збільшується в два рази.

По даних С.С. Соловцова [1] величина осьового зазору впливає на напрямки розвитку тріщин в осередку деформації при відрізанні. Якщо зазор z_{oc} вибраний неправильно, то ці напрямки не співпадають і торці на отриманих заготовках можуть бути ступінчастими. Напрямки розвитку тріщин від рухомого ножа і від нерухомого ножа в осередку деформації при відрізанні можна оцінити по розподілу інтенсивності напружень σ_i . На рис. 7 зображений розподіл напружень σ_i , який виникає при максимальному зусиллі, при відрізанні із зазором $z_{oc}=0,5$ мм.

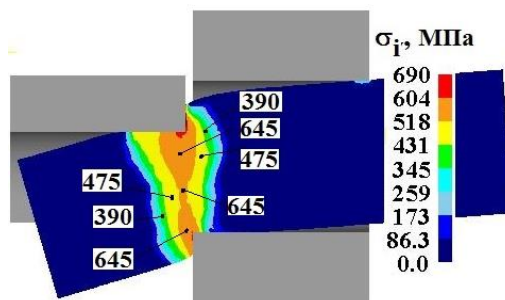


Рис. 7 – Розподіл напружень σ_i при максимальному зусиллі відрізання із зазором $z_{oc}=0,5$ мм

У здеформованому прутку біля торців ножів тримані області з величинами напружень $\sigma_i=645$ МПа. Така величина напружень σ_i виникає і по середині прутка. Тому при цьому зазорі співпадіння напрямки розвитку тріщин співпадають. На кінець, величину осередку деформації при відрізанні можна визначити по розподілу інтенсивності деформацій ϵ_i наприкінці відрізання. Такий розподіл показаний на рис. 8 для відрізання із $z_{oc}=0,5$ мм.

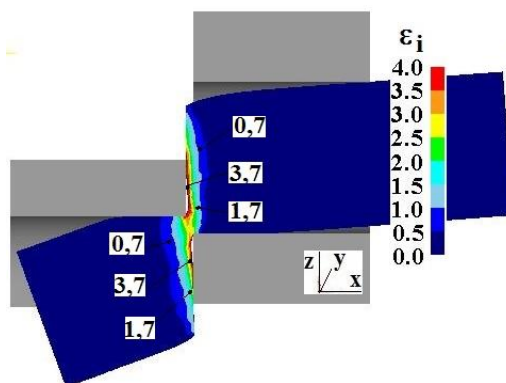


Рис. 8 – Розподіл деформацій ϵ_i наприкінці відрізання із зазором $z_{oc}=0,5$ мм

У самому прутку, в області торця, інтенсивність деформацій досягає величини $\epsilon_i=3,7$ з подальшим зменшенням до $\epsilon_i=3,7$ на віддалі 1,5 мм від торця та до $\epsilon_i=0,0$ на віддалі 3 мм. Аналогічний розподіл цих деформацій виникає у частині прутка, що відрізається. Необхідно відмітити, що при даній величині зазору має місце незначне викривлення на торці прутка і частині прутка, що відрізається. З урахуванням величини

зусилля відрізання (див. рис. 3), величину $z_{oc}=0,5$ мм можна вважати раціональною для отримання заготовок із $l/d=1$ із маловуглецевої сталі.

Висновки. Методом скінченних елементів визначений вплив осевого зазору між рухомим та нерухомим ножами при неповній відкритості відрізання заготовок із круглого прутка зсувом у штампі. Встановлені силові режими відрізання та питомі зусилля на ножах. Виявлені кінцеві форма і розміри отриманих заготовок. Встановлені причини появи умятин, утяжин та викривлення торців на отриманих заготовках.

Список літератури

1. Соловцов С.С. Безотходная резка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Роганов Л.Л. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №2(23). – С. 131–141.
3. Маркин Н.И. Технологические параметры отрезки коротких точных заготовок в штампах в состоянии всестороннего сжатия / Н.И. Маркин, Э.А. Кравцова, С.А. Москвитин и др. // – Заготовительное производство в машиностроении: Москва, 2010. №6. – С. 21–24.
4. Алифанов А.В. Оптимизация процесса рубки в штампах точных заготовок из прутка / А.В. Алифанов, А.М. Милукова, Л.Л. Сотник // Сб. статей XIII Межд. научн.-практ. конф. «Высокие технологии, экономика, промышленность». Т. 2, Часть 2: Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 18–21.
5. Алифанов А.В. Полузакрытый штамп для рубки сколом высокоточных прутковых заготовок / А.В. Алифанов, Л.Л. Сотник // Весник БарГУ. Серия: Физико-технические науки. – Барановичи: ГУ, 2013, № 1. – С. 38–43.
6. Карнаух С.Г. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката / С.Г. Карнаух, М.А. Винников, Д.С. Карнаух, // – Металлообработка: Санкт-Петербург. 2011. №1(61). – С. 35–41.
7. Дьямантипуло К.К. Качество реза и параметры точности заготовок при отрезке в штампах вращающимся инструментом / К.К. Дьямантипуло // Известия Московского ГТУ «МАМИ». Т2, 2013. – С. 271–276.
8. Роганов Л.Л. Перспективные направления развития оборудования для безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №3(36). – С. 207–212.
9. Роганов Л.Л. Разработка нового типа кузнечно-штамповочного оборудования для разделительных операций / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // – Металлообработка: Санкт-Петербург. 2010. №6(60). – С. 28–34.

10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained state / J.L. Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // – Materials Science and Engineering, 2009, Vol. 499. – Pp. 225–229.
11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // Materials Transactions. – The Japan Institute of Metals, 2009. – Vol. 50, No. 7. – Pp. 1671–1677.

References (transliterated)

1. Solovtsov S.S. Bezotkhodnaia razrezka sortovogo prokata v shtampakh / S.S. Solovtsov // – Moscow : Mashynostroenye, 1985. – 176 p.
2. Rohanov L.L. Razdelenye sortovogo prokata bolshykh poperechnykh secheniy sposobom otrezky sdvyhom / L.L. Rohanov, S.H. Karnaukh, N.V. Chosta // Obrabotka materialov davleniem. – Kramatorsk: DHMA, 2010. No.2(23). – Pp. 131–141.
3. Markyn N.Y. Tekhnologicheskiye parametry otrezky korotkykh tochnykh zahotovok v shtampakh v sostoianii vsestoronnego szhatiya / N.Y. Markyn, E.A. Kravtsova, S.A. Moskvityn y dr. // – Zahotovytelnoye proizvodstvo v mashynostroenii: Moscow, 2010. No.6. – Pp. 21–24.
4. Alyfanov A.V. Optymyzatsiya protsessa rubky v shtampakh tochnykh zahotovok yz prutka / A.V. Alyfanov, A.M. Myliukova, L.L. Sotnyk // Sb. statei KhIII Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Vysokye tekhnolohyy, ekonomika, promyshlennost». Vol. 2, Chast 2: Fundamentalnye y prykladnye yssledovaniya, razrabotka y pryemenenye vysokykh tekhnolohiy v promyshlennosti y ekonomyke. – Sankt-Peterburh: Yzd-vo Polytekh. un-ta, 2012. – Pp. 18–21.
5. Alyfanov A.V. Poluzakrytyi shtamp dlia rubky skolom vysokotochnykh prutkovykh zahotovok / A.V. Alyfanov, L.L. Sotnyk // Vesnyk BarHU. Seriya: Fyzyko-tekhnicheskyye nauky. – Baranovychy: HU, 2013, No.1. – Pp. 38–43.
6. Karnaukh S.H. Prymenenye kryteriyev razrusheniya materialov dlia vybora sposoba razdeleniya sortovogo prokata / S.H. Karnaukh, M.A. Vynnykov, D.S. Karnaukh, // – Metalloobrabotka: Sankt-Peterburh, 2011. No.1(61). – Pp. 35–41.
7. Dyamantopulo K.K. Kachestvo reza y parametry tochnosti zahotovok pry otrezke v shtampakh vrashchayushchysia ynstumentom / K.K. Dyamantopulo // Yzvestiya Moskovskogo HTU «MAMY». Vol.2, 2013. – Pp. 271–276.
8. Rohanov L.L. Perspektivnye napravleniya razvitiya oborudovaniya dlia bezotkhodnogo razdeleniya sortovogo prokata na mernye zahotovky / L.L. Rohanov, N.V. Chosta // Obrabotka materialov davleniem. – Kramatorsk: DHMA, 2013. No.3(36). – Pp. 207–212.
9. Rohanov L.L. Razrabotka novogo tipa kuznechno-shtampovochnoho oborudovaniya dlia razdelytelnykh operatsiy / L.L. Rohanov, S.H. Karnaukh, N.V. Chosta // – Metalloobrabotka: Sankt-Peterburh, 2010. No 6(60). – Pp. 28–34.
10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained state / J.L. Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // – Materials Science and Engineering, 2009, Vol. 499. – Pp. 225–229.
11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // Materials Transactions. – The Japan Institute of Metals, 2009. – Vol. 50, No. 7. – Pp. 1671–1677.

Надійшло (received) 20.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калюжний Володимир Леонідович (Калюжний Владимир Леонидович, Kaljuzhnyi Vladimir) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Касян Дмитро Вікторович (Касян Дмитрий Викторович, Kasian Dmytro) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; email: olesboxme@gmail.com

Русаков Роман Леонідович (Русаков Роман Леонидович, Rusakov Roman) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; e-mail: roman-rusakov@hotmail.com